

CDH-125型无阀气动潜孔锤冲击系统动力学特性分析

郭乃铭¹, 王清岩^{1,2*}, 罗朝椿¹, 钟蔚岭¹, 李昊轩¹

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林 长春 130026)

摘要: 本文针对CDH-125型气动潜孔锤冲击动力学过程进行研究, 对无阀配气活塞运动过程中的受力状态进行了准确的分析, 进而基于有限差分方法, 对潜孔锤工作过程中的热力学以及动力学微分方程组进行迭代求解, 得到潜孔锤活塞以及气室的动态工作特性, 包括活塞位移和速度之间的相对关系, 前、后气室的压力、温度交换关系等; 应用多物理场仿真软件SimulationX对有限差分法求解结果进行对比验证, 活塞冲程最大速度相差3%, 回程最大速度相差19%, 工作频率相差5%。基于上述结果, 进一步对活塞与内缸之间气体黏性摩擦力进行计算与分析, 结果表明: 与无黏流体理想情况下进行对比, 单一工作周期内黏性摩擦力使潜孔锤工作频率降低0.15%, 使活塞的冲程最大能耗增加0.05~1.34 J/次, 黏性摩擦力对潜孔锤动态性能的影响不可忽略。

关键词: 气动潜孔锤; 冲击动力学; 有限差分法; MATLAB; 气体黏性摩擦力; 动态工作特性; SimulationX

中图分类号: P634.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)03-0126-08

Dynamic characteristics analysis of CDH-125 valve-less pneumatic DTH hammer impact system

GUO Naiming¹, WANG Qingyan^{1,2*}, LUO Chaochun¹, ZHONG Weiling¹, LI Haoxuan¹

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. Key Laboratory of Drilling Technology for Complex Conditions of the Ministry of Natural Resources, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: This paper studies the impact dynamics process of the CDH-125 pneumatic down-the-hole (DTH) hammer, accurately analyzing the force state during the motion of the valveless distribution piston. Subsequently, based on the finite difference method, the thermodynamic and dynamic differential equations of the DTH hammer during its working process are iteratively solved to obtain the dynamic working characteristics of the DTH hammer piston and air chambers. These characteristics include the relative relationship between piston displacement and velocity, and the pressure and temperature exchange relationships in the front and rear air chambers. The results obtained from the finite difference method were compared and validated using the multiphysics simulation software SimulationX, showing a maximum speed discrepancy of 3% for the piston stroke, 19% for the return stroke, and 5% for the working frequency. Based on these results, further calculations and analyses of the air viscous friction force between the piston and the inner cylinder were conducted. The results indicate that, compared to the ideal situation with non-viscous fluid, the viscous friction force reduces the working frequency of the DTH hammer by 0.15% per working cycle and increases the maximum energy consumption of the piston stroke by 0.05~1.34J per cycle. The impact of viscous friction on the dynamic performance of the DTH hammer cannot be ignored.

Key words: pneumatic DTH hammer; impact dynamics; finite difference method; MATLAB; air viscous friction force; dynamic working characteristics; SimulationX

收稿日期: 2024-07-23; 修回日期: 2024-09-26 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.03.016

第一作者: 郭乃铭, 男, 汉族, 1999年生, 博士研究生, 地质工程专业, 研究方向为先进钻探设备与机具, 吉林省长春市朝阳区西民主大街938号, 1140277910@qq.com。

通信作者: 王清岩, 男, 汉族, 1970年生, 教授, 博士生导师, 地质工程专业, 博士, 从事先进设备与机具、基础工程施工设备与机具、流体传动及控制技术方面的科研与教学工作, 吉林省长春市朝阳区西民主大街938号, sinoprobe0905@126.com。

引用格式: 郭乃铭, 王清岩, 罗朝椿, 等. CDH-125型无阀气动潜孔锤冲击系统动力学特性分析[J]. 钻探工程, 2025, 52(3): 126-133.

GUO Naiming, WANG Qingyan, LUO Chaochun, et al. Dynamic characteristics analysis of CDH-125 valve-less pneumatic DTH hammer impact system[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(3): 126-133.

0 引言

旋冲钻进是硬岩地层钻井提速增效的主要技术手段,气动潜孔锤是实施旋冲钻进的核心钻具,受到国内外学者的广泛关注和研究。由于气动潜孔锤的结构和工作原理令其具有复杂的流体传动与多体动力学双向耦合作用,因此采用计算机进行潜孔锤的仿真模拟和数值计算十分必要^[1-8]。

通过计算机对潜孔锤的研究主要包括数值计算和仿真分析两种方法。目前基于虚拟样机技术和CFD技术的计算机仿真分析方法已经成为液动射流冲击器仿真技术的主流,主要包括以下4种计算机仿真分析技术^[9-21]:(1)计算机语言编程分析;(2)基于MATLAB的仿真分析;(3)CFD软件分析;(4)综合应用CFD、CAD和CAE的仿真分析。孙远敬等^[15]使用AMESim和MATLAB/Simulink建立了带有计算机控制系统的机电液一体化液压冲击器联合仿真模型,对冲击器的冲击特性进行了仿真研究。熊青山等^[16]基于VB,采用面向对象的设计方式进行可视化程序设计,并使用该软件进行了多种类型的潜孔锤设计,结果显示理论值与实测值基本吻合。赵宏强等^[20]根据假设条件建立了冲击器的基本运动方程,并采用FORTRAN语言编写了冲击器的数字仿真程序进行模拟分析。

既有潜孔锤仿真分析大多基于理想条件,很少考虑工作介质(如空气、水等)的变化对活塞的影响^[22-28]。在活塞往复运动过程中,周围空气在运动状态下对活塞产生抵抗剪切变形的力,即气体黏性摩擦力。以CDH-125型气动锤为例,它有3个工作气室,每个气室在不同工作阶段内部气体状态各不相同,这表明活塞所受的黏性摩擦力与其运动状态有关,即黏性摩擦力随时间动态变化。因此,需要在不同工作阶段线性求解每一阶段的黏性摩擦力。

为探究黏性摩擦力对活塞工作特性的影响程度,本文基于有限差分法,求解得到潜孔锤的工作特性曲线,并计算活塞所受的黏性摩擦力,研究其对潜孔锤工作过程的影响,从而获得更贴近潜孔锤真实工况的数值计算结果。通过计算分析,评估黏性摩擦力在潜孔锤仿真分析中是否可以被忽略。

1 CDH-125型气动潜孔锤结构与工作原理

1.1 潜孔锤结构

CDH-125型气动潜孔锤的结构如图1所示,潜

孔锤主要由上接头、配气座、内缸、外缸、活塞、衬套和钻头 etc 等零部件组成。具体功能如下:上接头用于连接钻杆;配气座和内缸负责将压缩空气输入到前、后气室中;活塞在压缩空气的作用下沿外缸往复运动,从而实现潜孔锤的冲击工作;衬套内设有花键以传递扭矩;卡钎套用于连接钻头并防止脱落;钻头为大直径硬质合金钻头,直径规格为 $\text{O}333\text{ mm}$ 。CDH-125型气动潜孔锤具有直径大、单次冲击功高和工作频率快等特点,能够在硬岩地层进行大孔径安全高效的钻进施工。



图1 CDH-125型气动潜孔锤结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the structure of CDH-125 pneumatic DTH hammer

1.2 潜孔锤工作原理

潜孔锤各阶段前、后气室的工作状态如表1所示。在该系统中,压缩空气首先进入中气室,且中气室始终保持气体流入状态,随后压缩空气从中气室流向前、后气室;压缩空气从中气室先进入后气室,前气室处于排空状态(a阶段, $0\text{ mm} \leq L < 5\text{ mm}$),后气室压力持续增大,推动活塞上行。到达b阶段($5\text{ mm} \leq L < 14\text{ mm}$)时,前气室进入密闭状态,后气室压力继续增大,推动活塞上行;到达c阶段($14\text{ mm} \leq L < 31\text{ mm}$)时,后气室停止进气并开始膨胀,前气室压缩压力增大,活塞在惯性作用下继续上行;到达d阶段($31\text{ mm} \leq L < 43\text{ mm}$)时,后气室接通大气,活塞继续上行,前气室通过环形狭缝接通大气;到达e阶段($43\text{ mm} \leq L \leq 115\text{ mm}$)时,前气室接通压缩空气,当活塞上行到顶点时(前后气室压力相等),活塞停止上行,此时前气室压力继续增大,使活塞下落,进入冲程阶段;到达f阶段时,前气室停止进气并继续膨胀,后气室处于排空状态;到达g阶段时,前气室膨胀压力降低,后气室密闭并开始压缩;到达h阶段时,前气室继续膨胀,后气室通入压缩空气,压力增大;到达i阶段时,前气室接通大气并排空,后气室压力增大,当活塞位移为零时撞击砧子,完成冲程,随后后气室压力持续增大,推动活塞向上运动,进入下一个回程循环。

表1 潜孔锤前、后气室工作状态
Table 1 Working status of the front and rear chambers of the DTH hammer

配气阶段	活塞位移 L / mm	前气室状态	后气室状态
a	$0 \leq L < 5$	前气室接通大气 排气	从中气室通入气体, 压力增大
b	$5 \leq L < 14$	前气室体积减小, 气体压缩	从中气室通入气体, 压力增大
c	$14 \leq L < 31$	前气室体积减小, 气体压缩	后气室密闭, 气体膨胀
d	$31 \leq L < 43$	前气室接通大气, 气体排气	后气室接通大气, 气体排气
e	$43 \leq L \leq 115$	从中气室通入气体, 压力增大	后气室接通大气, 气体排气
f	$31 \leq L < 43$	前气室体积增大, 气体膨胀	后气室接通大气, 气体排气
g	$14 \leq L < 31$	前气室体积增大, 气体膨胀	后气室密闭, 气体压缩
h	$5 \leq L < 14$	前气室体积增大, 气体膨胀	从中气室通入气体, 压力增大
i	$0 \leq L < 5$	前气室接通大气, 气体排气	从中气室通入气体, 压力增大

2 活塞受力分析及动力学微分方程的建立

2.1 活塞动力学模型

潜孔锤工作时,前腔和后腔的气体交替膨胀与压缩,活塞在上下两个腔室的压力差作用下循环进行回程和冲程。因此,活塞的循环运动受到其自身动力学参数以及两个腔室的流量和热力学参数的控制。对于气动潜孔锤,可以用准静态过程来描述两个气室之间复杂的热力学过程,这意味着活塞的运动过程可以视为由一个平衡状态连续地过渡到另一个平衡状态,即气动潜孔锤的整个气动系统随时都处于内平衡状态。活塞的运动过程可以看作是若干个热力学状态的连续变化。这些变化过程可以用微分方程来表示,再通过有限差分法求解,从而得到活塞整个运动过程的数值解。

活塞的受力情况如图2所示,由牛顿第二定律得到活塞的运动学微分方程:

$$\frac{d^2L}{dt^2} = (P_r A_4 + P_r A_5 + P_q A_2 - P_q A_3 - P_i A_1 - F_f) / M - g \cos \theta \quad (1)$$

式中: L ——活塞位移, m; P_r 、 P_i ——分别表示后腔、

前腔的气体压力, Pa; $A_1 \sim A_5$ ——分别表示活塞5个受力台阶的有效作用面积, m^2 ; P_q ——气动系统工作压力, Pa; F_f ——活塞所受黏性摩擦力, N; M ——活塞质量, kg; g ——重力加速度, 取 9.8 m/s^2 ; θ ——钻孔轴线与竖直方向夹角, ($^\circ$)。

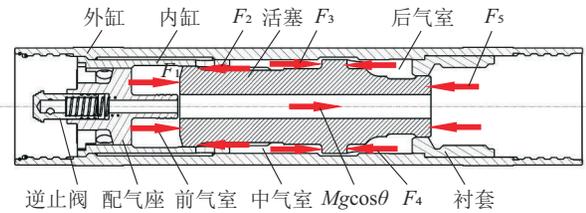


图2 潜孔锤活塞在缸体内受力示意

Fig.2 Force diagram of the DTH hammer piston within the cylinder

前、后气室所进行的热量交换过程与外界相隔绝,所以活塞的工作过程可以视为绝热过程,前、后气室有质量为 dm 的气体流入或流出时,可以用微分方程表示为:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{K}{V} (\pm RT \frac{dm}{dt} \pm P \frac{dV}{dt}) \quad (2)$$

式中: P ——压力, Pa; K ——绝热指数, 1.41; V ——气室的体积, m^3 ; R ——气体常数, $287 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$; T ——气室的温度, K。

在绝热变化中,气室的温度和压力存在代数关系,温度变化的微分方程为:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T}{P} \frac{K-1}{V} (\pm RT \frac{dm}{dt} \pm P \frac{dV}{dt}) \quad (3)$$

气体在气室之间狭缝流动时,其流动状态会发生改变,即从亚音速变为超音速,所以得到气室之间压缩空气质量流量的微分方程为:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dm_i}{dt} &= A_i P_i \sqrt{\frac{2}{RT_i} \frac{K}{K-1} \left[\left(\frac{P'_i}{P_i} \right)^{2/K} - \left(\frac{P'_i}{P_i} \right)^{(K+1)/K} \right]} \\ &\quad \text{当 } (P'_i/P_i) \geq [2/(K+1)]^{K/(K-1)} \\ \frac{dm_i}{dt} &= \frac{A_i P_i}{\sqrt{RT_i}} \sqrt{\frac{2K}{K+1} \left(\frac{2}{K+1} \right)^{2/(K-1)}} \\ &\quad \text{当 } (P'_i/P_i) < [2/(K+1)]^{K/(K-1)} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

式中: m_i ——前气室、中气室和后气室内气体质量, kg; A_i ——各气室进气通道过流面积, m^2 ; P_i ——各气室压力, Pa; T_i ——各气室温度, K; P'_i ——各气室

进气压力, Pa。

通过式(1)~(4)可以准确地描述前、后气室热力学变化过程以及活塞的运动过程, 针对气室 a~e 阶段列出 5 组回程微分方程组, 再针对 e~i 阶段列出 5 组冲程微分方程组。

2.2 活塞所受气体黏性摩擦力的计算

在流体力学中, 作用于流体质点上的力一般分为两种: 质量力和表面力。本文所研究的气体对活塞的黏性摩擦力应属于表面力。流体在运动状态下抵抗剪切变形的能力称为黏性。实际上, 所有流体都具有黏性, 不过不同流体的黏性大小不同(如油、油漆等流体黏性较大, 而水、空气等流体黏性较小)。流体的黏性是导致流动流体产生机械能损失的主要原因, 根据牛顿平板实验可以得到牛顿内摩擦公式:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (5)$$

式中: τ ——单位面积上的摩擦应力, N/m^2 ; μ ——流体动力黏度, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$; du/dy ——流速梯度, 它表示流速沿垂直于流速方向 y 的变化率, 实质上它代表流体微团的剪切变形速率。

将式(5)应用于本文所研究压缩空气对活塞的黏性摩擦力, 得到适用于本文研究对象的黏性摩擦力公式为:

$$F_t = \mu A_p \frac{dL}{dt} \frac{1}{h} \quad (6)$$

式中: A_p ——压缩空气与活塞的接触面积, m^2 ; dL/dt ——活塞的运动速度, m/s ; h ——运动体(压缩空气)与边界(内、外缸)之间的距离, 此处取 0.00005 m 。

进一步, 在对活塞运动过程的研究中, 本文将气体运动的区域划分为前、中、后 3 个气室, 显然 3 个气室中的气体状态均不同, 而动力黏度 μ 是与气体温度有关的状态量, 将 μ 展开计算:

$$\mu = \rho\gamma = \rho\gamma_0(T_i/T_0)^{3/2} \quad (7)$$

式中: ρ ——气体密度, kg/m^3 ; γ_0 ——标准状态下的气体运动黏度, m^2/s ; T_i ——各个气室的温度, K ; T_0 ——标准状态温度, 273.15 K 。

最终得到压缩空气对活塞的黏性摩擦力 F_t 为:

$$F_t = \rho\gamma_0 \left(\frac{T_i}{T_0} \right)^{3/2} A_p \frac{dL}{dt} \cdot \frac{1}{h} \quad (8)$$

3 基于 MATLAB 的有限差分法求解过程

3.1 活塞动力学微分方程数值解

对于 2.1 中给出的微分方程组, 本文基于有限差分法进行求解。在 MATLAB 中使用四阶龙格-库塔法求解, 给定初始条件: 温度为 293.15 K , 注入压缩空气压力为 2.0 MPa , 气室初始压力为 0.1013 MPa , 迭代步长为 10^{-4} s , 活塞质量为 113 kg 。求解所得结果如图 3 所示。

从图 3(a) 活塞速度结果图可知, 活塞回程的最大速度为 2.46 m/s , 冲程的最大速度为 -2.55 m/s , 活塞撞击砧子的速度为 -1.8 m/s 。

从图 3(b) 前、后气室压力变化图可知, 在阶段 a~c 中, 后腔压力由大气压迅速升高至 2.0 MPa 并保持一段时间, 前气室由于体积减小压缩气体, 压力缓慢上升; 在阶段 c~d 中, 后气室接通大气压力迅速降低, 前气室通过环形狭缝接通大气排空; 在阶段 d~e 中, 活塞进入冲程阶段, 前气室通入压缩空气压力逐渐上升, 当前、后气室曲线相交时二者压力相等, 前气室压力达到最大值 0.4 MPa , 随后活塞加速度方向改变向下运动, 后气室压力缓缓上升, 进入阶段 f~i, 活塞完成一个回程和冲程循环。

从图 3(c) 不同工作压力下活塞位移对比图可以看出, 对于 2.0 MPa 工作压力, 在前 0.5 s 内, 活塞工作状态未达到稳定, 这是由于前、后气室压力或热量交换不完全所致。 0.5 s 后, 整个系统趋于稳定, 位移稳定在 0.082 m , 活塞达到最大位移时有 0.033 m 的气垫, 潜孔锤的工作频率为 $9\sim 10 \text{ Hz}$ 。当工作压力为 1.0 MPa 和 1.5 MPa 时, 活塞的位移分别是 0.057 m 和 0.072 m , 对比 2.0 MPa 压力, 潜孔锤位移分别减少 30% 和 12% , 其工作频率分别降低 22% 和 5% 。

从图 3(d) 活塞单次回程、冲程的位移和速度对比图可以看出, 在阶段 I, 活塞在后气室压缩空气作用下向上回程运动, 当位移达到 0.031 m 时, 活塞此时为回程最大速度 2.46 m/s , 此时后气室即将关闭; 在阶段 II, 后气室进入密闭状态, 活塞在惯性作用下继续回程上行, 但此时活塞上行速度逐渐降低; 在阶段 III, 此时前气室有气体流入, 活塞在惯性作用下上行, 但速度逐渐降低至零, 阶段 III 末期活塞回程至位移最大处 0.082 m ; 在阶段 IV, 活塞进入冲程阶段, 当活塞位移达到 0.005 m 时, 获得冲程最大速度 -2.55 m/s ; 在阶段 V, 活塞后气室进入密闭状态, 后气室形成气垫使活塞受到缓冲作用, 其冲

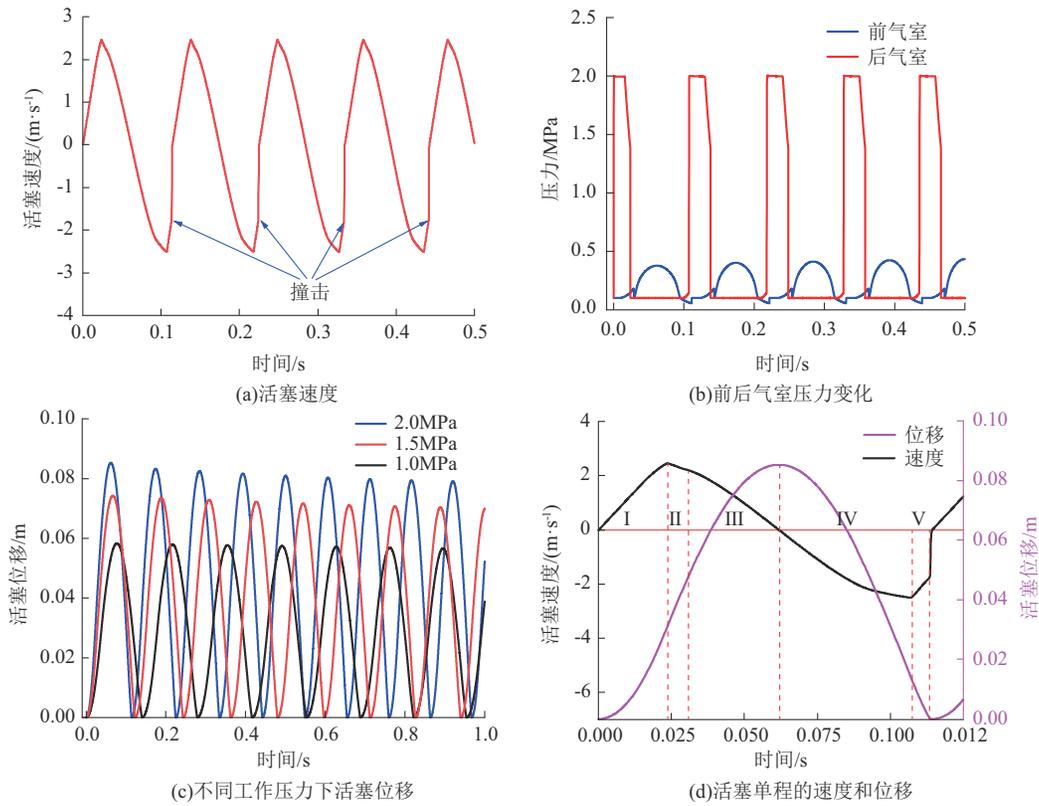


图3 有限差分法求解结果示意
 Fig.3 Schematic diagram of the solution results using the finite difference method

击速度小幅降低,活塞冲击砧子的速度为 -1.8 m/s ,随后活塞进入新的回程、冲程循环。

3.2 活塞气体黏性摩擦力数值解

将式(8)代入到式(1)中,可以得到活塞在气体黏性摩擦力作用下的受力方程。由于活塞在不同运动阶段各个气室的气体状态均不相同,需要根据活塞的运动状态对黏性摩擦力进行分段计算。在MATLAB中使用四阶龙格-库塔法再次进行求解,求解结果如图4所示。

从图4(a)活塞单次回程和冲程中黏性摩擦力与位移的关系可以看出,在阶段a~b,压缩空气进入中、后气室,活塞开始缓慢向上运动,活塞所受的黏性摩擦力随之逐渐增加至 -5.6 N ;在阶段c,压缩空气不再进入后气室,黏性摩擦力瞬间减小至 -4.3 N ,随后随活塞速度增大,黏性摩擦力缓慢增加至 -5 N ;在阶段d,后气室接通大气,表明后气室处的活塞表面不再受黏性摩擦力作用,摩擦力值降低至 -3 N ;在阶段e,前气室通入压缩空气,黏性摩擦力值瞬时增大至 -4.8 N ,随后活塞上行至最高点,摩擦力随之降至0。后续活塞进入冲程阶段,摩擦力

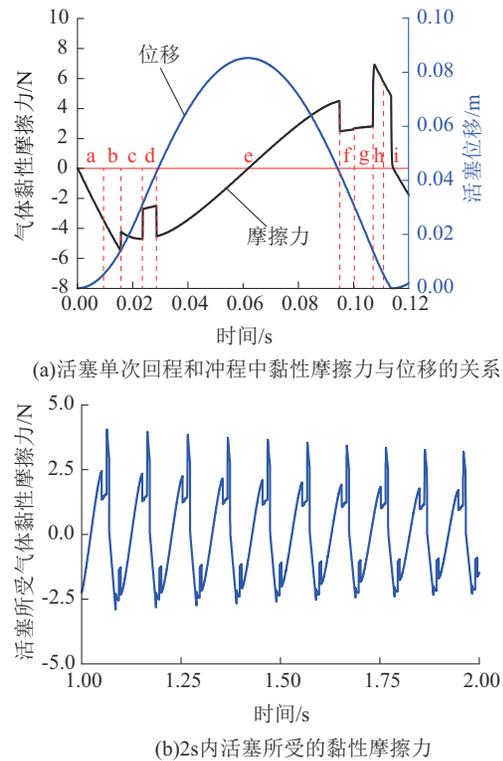


图4 活塞所受气体黏性摩擦力
 Fig.4 Air viscous friction force acting on the piston

逐渐增加至 4.3 N;在阶段 f~g,前气室不再通入压缩空气,开始时摩擦力瞬间降至 2.4 N,随后活塞冲程速度增加,摩擦力随之增大至 2.8 N;在阶段 h,后气室进入密闭状态,气室中气体压缩,摩擦力迅速增大至 7 N;在阶段 i,压缩空气通入后气室,活塞冲程进入减速阶段直到撞击砧子,摩擦力随之降至 0。

从图 4(b) 2 s 内活塞所受的黏性摩擦力示意图可以看出,随着活塞工作状态趋于稳定,其所受的黏性摩擦力值也趋于稳定。稳定回程最大摩擦力值为 -2.5 N,稳定冲程最大摩擦力值为 3.3 N。

图 5 所示为活塞在有气体黏性摩擦力作用和理想状态下工作的位移对比图,可以看到,在前 1.5 s 内,两者的位移基本相同。1.5 s 后,在摩擦力作用下,活塞的工作频率略有降低,频率明显低于无摩擦力作用的情况。2 s 内,活塞在黏性摩擦力作用下的频率降低了 0.15%。随着潜孔锤继续工作,活塞在黏性摩擦力作用下的频率逐渐降低。

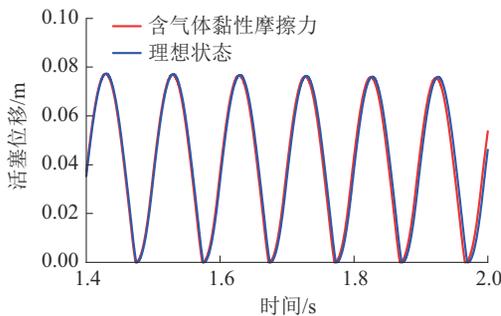


图 5 活塞在理想状态和摩擦力作用下的位移对比
Fig.5 Displacement comparison diagram of the piston under ideal conditions and with friction force

图 6 为活塞有气体黏性摩擦力作用和理想状态下冲击最大动能对比图,活塞获得冲程最大速度时产生最大动能;如图在活塞前 18 次冲击中,其冲程最大动能受气体黏性摩擦力作用产生损耗,能量损耗值在 0.05~1.34 J 之间,活塞与内缸之间的气体在活塞运动时产生的黏性力阻碍其往复运动,造成活塞产生动能损失。考虑到气体黏性摩擦力对潜孔锤的工作频率以及冲击动能造成较大影响,因此,在计算分析中不能将气体摩擦力忽略。

4 基于多物理场仿真软件的对比分析

为验证有限差分法所求解解的准确性,本文

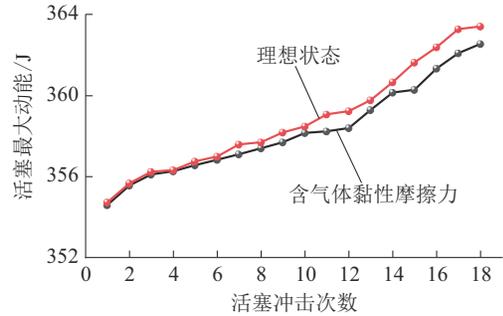


图 6 活塞在理想状态下和摩擦力作用下产生的能量对比
Fig.6 Energy comparison diagram of the piston under ideal conditions and with friction force

基于多物理场仿真软件 SimulationX 进行了气动冲击机构的动态仿真分析,综合考虑各组成环节的相互耦合作用。整个系统包括空压机、活塞、砧子、配气机构等,图 7 为 CDH-125 型潜孔锤的虚拟样机,所设定的参数均与有限差分法的参数保持一致。

对比虚拟样机和有限差分法的求解结果,图 8 所示为两种方法求解的活塞速度对比图。两种方法得到的工作频率相同,为 9~10 Hz,回程最大速度相差 0.55 m/s。有限差分法中,前气室到达压力阈值的时间比虚拟样机法的结果早 0.03~0.04 s。两种方法结果之间的差异是由于虚拟样机法通过阀体控制活塞运动,而有限差分法是直接通过热量交换和运动定律控制活塞运动。在活塞刚开始运动时,虚拟样机法的阀体和油缸充满气体所需时间更长,因此导致有限差分法求解的活塞速度在前几次回程时间早于虚拟样机法。然而,在活塞第七次回程后,两种方法求解结果的频率和变化幅度趋于一致。即在达到稳定状态后,冲程最大速度相差 3%,回程最大速度相差 19%,工作频率相差 5%。由此可见,自编程序运算与商用软件进行的模拟,均可在一定程度上反映潜孔锤工作的动态性能。

5 结论

(1) 基于多体动力学理论和热力学原理建立了活塞运动的微分方程组,在 MATLAB 中使用四阶龙格-库塔法对活塞的动力学过程进行数值求解。结果表明:当活塞回程位移为 0.031 m 时,活塞获得回程最大速度 2.46 m/s,当活塞冲程位移为 0.005 m 时,活塞获得冲程最大速度 -2.55 m/s,活塞撞击砧子的末速度为 -1.8 m/s,活塞最大位移稳定在

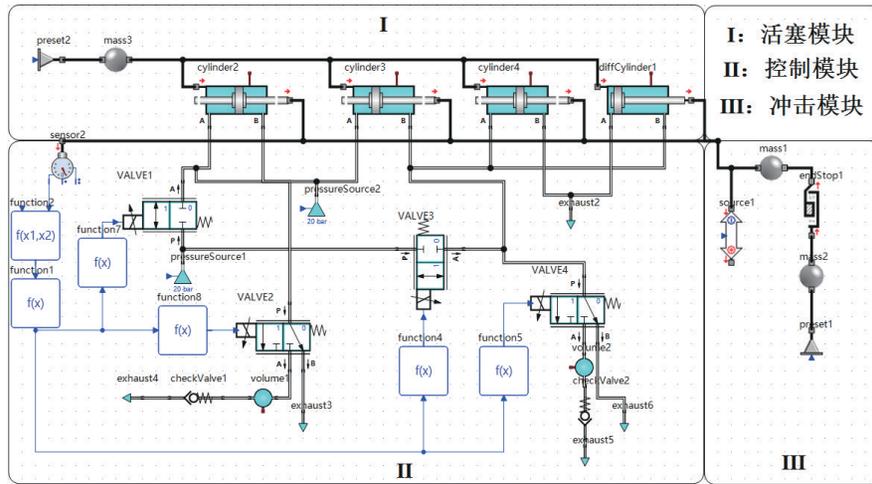


图7 CDH-125型潜孔锤SimulationX建模示意

Fig.7 Schematic diagram of CDH-125 DTH hammer modeling in SimulationX

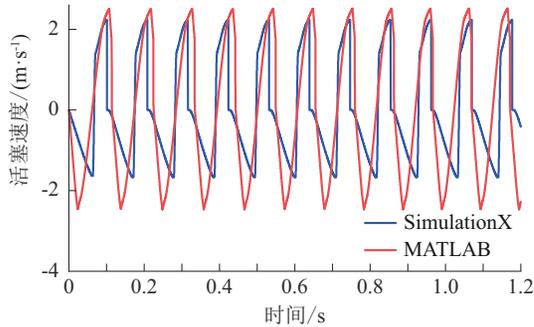


图8 活塞往复运动速度有限差分数值求解和多物理场仿真软件分析结果对比

Fig.8 Comparison of piston reciprocating speed numerical solution using finite difference method and multiphysics simulation software analysis results

0.082 m,工作频率为9~10 Hz。

(2)通过多物理场仿真软件SimulationX,以同样的工作参数对CDH-125型潜孔锤的气动冲击机构进行了动态仿真分析。与前述有限差分法的求解结果进行对比,结果表明:活塞最大冲击末速度以及回程最大速度之间的差值不超过10%。

(3)重点讨论了气体黏性摩擦力对活塞的影响,而黏性摩擦力本身取决于活塞运动速度数值模拟的结果。活塞因受到黏性摩擦力影响,其工作频率较不考虑摩擦力作用时降低了0.18%。活塞冲程最大动能受气体黏性摩擦力作用产生损耗,能量损耗值在0.05~1.34 J内。由此可见,气体黏性摩擦力在潜孔锤的仿真计算中不能被忽略,它在实际工作中对活塞的工作频率以及冲击动能产生较大影响。

参考文献 (References):

- [1] 张青春. 气动反循环潜孔锤跟管钻具结构与优化[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
ZHANG Qingchun. Air reverse circulation DTH hammer drilling tool with tube structural designation and optimization [D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [2] 魏俊. 气动冲击潜孔锤动力性能仿真研究[D]. 荆州: 长江大学, 2019.
WEI Jun. Dynamic performance simulation of pneumatic impact DTH hammer [D]. Jingzhou: Changjiang University, 2019.
- [3] 殷其雷. 潜孔锤反循环钻探工艺试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
YIN Qilei. Research on the drilling technology of DTH hammer reverse circulation [D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [4] 赵江鹏, 郝世俊. 气动潜孔锤技术在矿山事故钻孔救援中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(11): 24-34.
ZHAO Jiangpeng, HAO Shijun. Application of pneumatic DTH hammer in drilling rescue of mine accidents [J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(11): 24-34.
- [5] 盛洁. 基于MATLAB/Simulink的动压反馈组合流控液压冲击振动装置动态特性分析[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
SHENG Jie. Dynamic analysis of working characteristics of dynamic pressure feedback complex fluidic vibration device based on MATLAB/simulink [D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [6] Song H Y, Shi H Z, Ji Z S, et al. The percussive process and energy transfer efficiency of percussive drilling with consideration of rock damage [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 119: 1-12.
- [7] 钟蔚岭, 王清岩, 盛洁, 等. HCW-90型全液压自动猫道钻具翻板机构控制优化[J]. 钻探工程, 2021, 48(S1): 324-332.
ZHONG Weiling, WANG Qingyan, SHENG Jie, et al. Control synchronization optimization for the transfer mechanism of HCW-90 full hydraulic automatic catwalk [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(S1): 324-332.
- [8] 李苓豪, 王清岩, 范黎明, 等. 反循环气动潜孔锤进气端分流引射接头设计及结构参数分析[J]. 世界地质, 2024, 43(2): 299-307.

- LI Linghao, WANG Qingyan, FAN Liming, et al. Design of distribution jet joint at inlet port of reverse circulation pneumatic DTH hammer and analysis of its structure parameters[J]. *Global Geology*, 2024, 43(2):299-307.
- [9] 姜磊, 兰三东, 陈孟举, 等. 集束式潜孔锤气流调节机构同步特性的分析[J]. *机床与液压*, 2022, 50(13):79-84.
- LOU Lei, LAN Sandong, CHEN Mengju, et al. Analysis of synchronous characteristics of cluster type DTH hammer air flow regulating mechanism [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2022, 50(13):79-84.
- [10] 莫海涛, 郝世俊, 赵江鹏. 煤矿区地面大直径钻孔成孔关键技术及装备[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(5):190-197.
- MO Haitao, HAO Shijun, ZHAO Jiangpeng. Key technology and equipment of hole-forming for surface large diameter borehole in coal mine area[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(5):190-197.
- [11] Li Y L, Peng J M, Zhang P Y, et al. Hard rock fragmentation in percussion drilling considering confining pressure: insights from an experimental study [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 148:104961.
- [12] 李昊轩, 王清岩, 金增伍, 等. 单机械手夹持状态下钻杆运移平稳性分析[J]. *钻探工程*, 2022, 49(3):76-82.
- LI Haoxuan, WANG Qingyan, JIN Zengwu, et al. Analysis of smooth movement of drill pipes clamped with a single manipulator[J]. *Drilling Engineering*, 2022, 49(3):76-82.
- [13] 王清岩. 基于虚拟样机技术的动压反馈式液动冲击器结构设计及动态仿真分析[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- WANG Qingyan. Structure design and dynamic simulation of hydrokinetic hammer with dynamic pressure feedback using virtual prototyping technology[D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [14] 王四一, 孙友宏, 王清岩, 等. 正反气动冲击机构系统仿真分析及结构优化[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2011(S1):242-247.
- WANG Siyi, SUN Youhong, WANG Qingyan, et al. System simulation and structure optimization of reversible pneumatic impact mechanism [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2011(S1):242-247.
- [15] 孙远敬, 徐建新, 沈潇. 机电一体化液压冲击器的动态特性仿真[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2014, 33(11):1534-1538.
- SUN Yuanjing, XU Jianxin, SHEN Xiao. Dynamic characteristics simulation research of mechatronical hydraulic shocker [J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition)*, 2014, 33(11):1534-1538.
- [16] 熊青山, 殷琨, 祁宏军, 等. 可视化无阀式气动潜孔锤仿真电算软件设计[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2003, 33(4):571-574.
- XIONG Qingshan, YIN Kun, QI Hongjun, et al. visual simulation zooming software design on valveless pneumatic DTH [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2003, 33(4):571-574.
- [17] 刘建林. 气体钻井用贯通式潜孔锤关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- LIU Jianlin. Researches on the key technologies of Hollow-Through DTH used in gas drilling[D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [18] 卜长根. 潜孔锤虚拟样机及其凿岩瞬态冲击过程的研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- BU Changgen. Study on DTH hammer virtual prototype and its transient impact while rock drilling[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012.
- [19] 郑洽川. 潜孔锤反循环跟管钻进技术的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- ZHENG Zhichuan. Research on reverse circulation down-the-hole hammer drilling with casing technology[D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [20] 赵宏强, 高斌, 李美香. 潜孔钻机回转液压系统的建模与仿真[J]. *计算机仿真*, 2009, 26(1):352-354.
- ZHAO Hongqiang, GAO Bin, LI Meixiang. Modeling and simulation of rotating hydraulic system in down-the-hole drill [J]. *Computer Simulation*, 2009, 26(1):352-354.
- [21] 刘宝林. GYC-90 水压阀式冲击器位置反馈控制机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- LIU Baolin. Research on displacement feedback control mechanism of GYC-90 water powered valve-impactor[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [22] Cao P L, Cui G Q, Qi B, et al. Investigation on the cuttings carrying capacity of a novel retractable drill bit used in casing while drilling with air reverse circulation [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 219:111079.
- [23] Zhang X X, Luo Y J, Fan L M, et al. Investigation of RC-DTH air hammer performance using CFD approach with dynamic mesh method [J]. *Journal of Advanced Research*, 2019, 18:127-135.
- [24] 杨秋明, 周兢, 王瑜, 等. 基于 ABAQUS 的气动潜孔锤球齿碎岩及布齿优化[J]. *钻探工程*, 2024, 51(1):40-50.
- YANG Qiuming, ZHOU Jing, WANG Yu, et al. Pneumatic DTH hammer tooth crushing and optimization of teeth arrangement based on ABAQUS [J]. *Drilling Engineering*, 2024, 51(1):40-50.
- [25] 杨合, 戚波, 曹品鲁, 等. FGQ-600 型潜孔锤钻头冲击应力作用下强度可靠性分析[J]. *钻探工程*, 2023, 50(1):115-124.
- YANG He, QI Bo, CAO Pinlu, et al. Strength analysis of FGQ-600 type DTH hammer drill bit used for casing while drilling [J]. *Drilling Engineering*, 2023, 50(1):115-124.
- [26] 蔡芝源, 江红祥. 潜孔锤破岩系统动力学特性研究[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(1):62-69.
- CAI Zhiyuan, JIANG Hongxiang. Dynamic characteristics of rock crushing system with DTH hammer [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(1):62-69.
- [27] 高文强. 组合风动潜孔锤研究及配气机构的设计与仿真[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- GAO Wenqiang. The research of combined pneumatic DTH hammer and the design and simulation of air distribution mechanism [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [28] 杨冬冬, 赵江鹏, 赵建国, 等. 煤矿井下硬岩层快速成孔钻进技术与发展趋势[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(12):136-140.
- YANG Dongdong, ZHAO Jiangpeng, ZHAO Jianguo, et al. Fast drilling technology and development tendency of hard rock in underground coal mine [J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(12):136-140.

(编辑 王跃伟)